

УДК 622.87: 622.831.312

© М.Ю. Иконников

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ СДВИЖЕНИЙ В ПОДРАБОТАННОМ УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОУДЕРЖИВАЮЩИХ ПОЛОСТЕЙ

Решение задачи определения влияния напряженно-деформированного состояния подработанного углепородного массива при преобладающей трещиноватости на интенсивность выделения метана в выработки добычных участков глубоких шахт в упругопластической постановке произведено совмещением процедуры метода конечных элементов и метода начальных напряжений. Результаты работы являются базовыми для оценки распределения давления газа при известных значениях проницаемости массива.

Рішення задачі визначення впливу напружено-деформованого стану підробленого вуглепородного масиву при переважаючій тріщинуватості на інтенсивність виділення метану у виробки добувних ділянок глибоких шахт в пружнопластичній постановці виконано суміщенням процедури методу кінцевих елементів і методу початкових напружень. Результати роботи є базовими для оцінки розподілу тиску газу при відомих значеннях проникності масиву.

Solution for the effect of the stress-strain state of the ugleporodnogo array at the prevailing rate on the fracturing of methane release in the development of mining sites in deep mines in the elastoplastic formulation produced by a combination of the finite element procedure and the method of initial stresses. The results of the evaluation are the base for the distribution of gas pressure in the known values of the permeability of the array.

В настоящее время разработаны алгоритмы расчета вентиляционного режима угольных шахт по газовому фактору, автоматически учитывающие изменения аэрогазодинамических параметров, топологию и взаимосвязанность ветвей сети и позволяющие определить параметры регулирования расхода воздуха в вентиляционной системе произвольной сложности. Созданы исполнительные устройства регуляторов расхода воздуха во взрывозащищенном исполнении, пригодные для шахт опасных по газу или пыли, а также аппаратура управления ими.

Однако существующие методы управления проветриванием выемочных участков по газовому фактору недостаточно эффективны, поскольку они не учитывают реальное геомеханическое состояние вмещающих пород участка, их метаносность и трещиноватость, опасность внезапного метановыделения из выработанного пространства лавы, подготовительных выработок и их сопряжений.

При ведении очистных работ в горном массиве происходят тесно взаимосвязанные геомеханические процессы сдвигания, расслоения, деформирования и трещинообразования пород, а также процессы интенсивной десорбции и фильтрации в основном из сближенных пластов и высокопористых пород песчаника, которые в сумме имеют большую мощность, могут интенсивно расслаиваться, и, в конечном счете, обрушаться даже без принудительной посадки кровли, выталкивая значительные объемы накопившегося газа из образовавшихся полостей. Характер протекания указанных процессов обуславливает сложную газодинамическую обстановку добычного участка, темпы и безопасность ведения горных работ.

Проблема полной или частичной дегазации также теснейшим образом связана с геомеханикой и газодинамикой углепородного массива, подверженного процессам сдвижения углевлещающей толщи. Особенно сложности возникают тогда, когда выемочные столбы имеют мелкоамплитудную асимметричную пликативную складчатость или дизъюнктивную нарушенность. Необходимость решения указанной проблемы диктуется постоянным увеличением газообильности угольных шахт и несоответствием показателей работы добычных участков в сложных горно-геологических условиях возможностям современной высокопроизводительной техники и технологии [1, 2].

На высокопроизводительных шахтах Донбасса разработку угольных пластов ведут, как правило, столбовыми системами с полным обрушением кровли. Загазирование лав и штреков в шахтах, опасных по газу, происходит, в основном, при наличии больших объемов выработанных пространств по всей длине выемочных столбов и интенсивной отработке очистных забоев. Наиболее опасными являются колебания содержания метана, вызванные посадками основной кровли.

Поскольку породный массив имеет весьма сложное строение, обусловленное разнообразием структур залегания пластов, их геологической слоистостью, нарушенностью, трещиноватостью, разбросом прочностных свойств, то исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) выполнены методом конечных элементов в плоской постановке, единственным известным в настоящее время методом, позволяющим моделировать объекты такой сложности. Этим методом рассчитывают мосты, тоннели, подземные и наземные строительные объекты. К сожалению, методы объемного математического моделирования разработаны только для однородных сред, поэтому, несмотря на свою привлекательность, их возможности значительно уступают при решении подобных задач.

В целом, методика оценки состояния породного массива методами математического моделирования включает: *1) разработку расчетной схемы и ввод реальных данных по напластованию пород, их физико-механическим свойствам и элементам технологии ведения горных работ; 2) определение и анализ разрушенных зон по длине выемочного столба, в которых наиболее интенсивно происходят деформационные и фильтрационные процессы; 3) поэтапные расчеты ориентации эксплуатационных трещин с учетом разрушения реальных источников выделения метана; 4) определение текущей стадии деформирования массива по результатам шахтных исследований* [3, 4].

Для решения сложных задач определения НДС в упругопластической постановке совмещены процедуры метода конечных элементов (МКЭ) и метода начальных напряжений (МНН). Определение предельных состояний породного массива для зон концентрации напряжений и разгрузки дает возможность максимально приблизить математическую модель разрушения неупругой среды к реальному поведению горных пород под действием нагрузки. Необходимо подчеркнуть, что при проведении каждой последующей итерации программа автоматически вычисляет и отслеживает состояние каждого элемента, автоматически производит необходимые замены даже при разрыве одной связи между уз-

лами. Это является существенным преимуществом, так как дает широкие возможности для определения наиболее вероятных областей зарождения и распространения зон разрушения в массиве, позволяет детально исследовать сложные геомеханические процессы, оказывающие превалирующее влияние на выделение метана в выработки.

Кроме методического и математического обеспечения расчетов при разработке геомеханической расчетной схемы большое значение имеет правильный учет исходных данных путем задания корректных граничных условий. Поэтому разработка геомеханических моделей включает три этапа: 1) *структурирование массива по литологическим типам*, 2) *разработку физических моделей с заданием силовых граничных условий*, 3) *разработку геомеханических расчетных схем*.

Поскольку в течение периода эксплуатации выработок геомеханическая и аэрогазодинамическая обстановка существенно изменяются, то необходимо заранее определять области техногенного разрушения породного массива и интенсивной фильтрации метана из них в выработки на всех стадиях, которыми характеризуется отработка выемочного столба. Моделирование выполнено для конкретных горно-геологических условий шахты им. А.Ф. Засядько, пласт m_3 , глубина разработки 1200-1300 м. Расчеты проведены на вычислительном комплексе «ГЕО-РС (v.5.0.)», разработанном в ИГТМ НАН Украины [3, 4].

Угольный пласт m_3 содержит коксующийся уголь марки «Ж». Геологическая мощность пласта 1,59-2,14 м. Плотность угля – 1,33 т/м³. Пласт опасен по газу, пыли, суффлярным выделениям метана, внезапным выбросам угля и газа, склонен к самовозгоранию. Особо опасны по самовозгоранию участки тектонических нарушений, зоны повышенной трещиноватости и зоны фациального замещения угля породами кровли. Природная метаноносность – 20-22 м³/т. Непосредственная кровля представлена аргиллитом, выше которого залегают алевролиты и отложения газоносных песчаников. Слои песчаника одновременно являются как источниками газа метана, так и мощными концентраторами напряжений, препятствиями для фильтрации метана и определяющими конструктивными элементами газодерживающих полостей. Мощность непосредственной кровли до 5 м, всего слой аргиллита – до 24 м. Аргиллит средней крепости, от весьма неустойчивого в зонах тектонических нарушений и повышенного горного давления до слабоустойчивого. Основная кровля легкообрушаемая.

Размер расчетной схемы принят 160 м по высоте и 340 м по ширине, которая включает три слоя газонасыщенного песчаника основной кровли пласта m_3 . Расчетная схема состоит из 3920 элементов и 2050 узлов, для которых в результате расчетов были получены значения напряжений в элементах, деформаций и смещений узлов. Поскольку задача решалась в двумерной постановке, расчетные сечения были выбраны по продольному разрезу в центральной части лавы и серии поперечных разрезов, проходящих через выработанное пространство лавы, зону отжима, зону опорного давления, рис. 1. Эти участки были определены заранее в результате шахтных измерений и опыта отработки очистных забоев в аналогичных условиях.

В основу определяющей концепции исследований газодерживающих полостей заложено изучение и контроль разрушения прочных пород основной кровли. В кровле угольного пласта m_3 находятся три мощных пласта песчаника, шестиметровый слой песчаника находится на расстоянии 18 м от пласта (вынимаемая мощность угольного пласта 1,8 м), тридцатиметровый слой – на расстоянии 51 м, третий слой – 103,6 м.

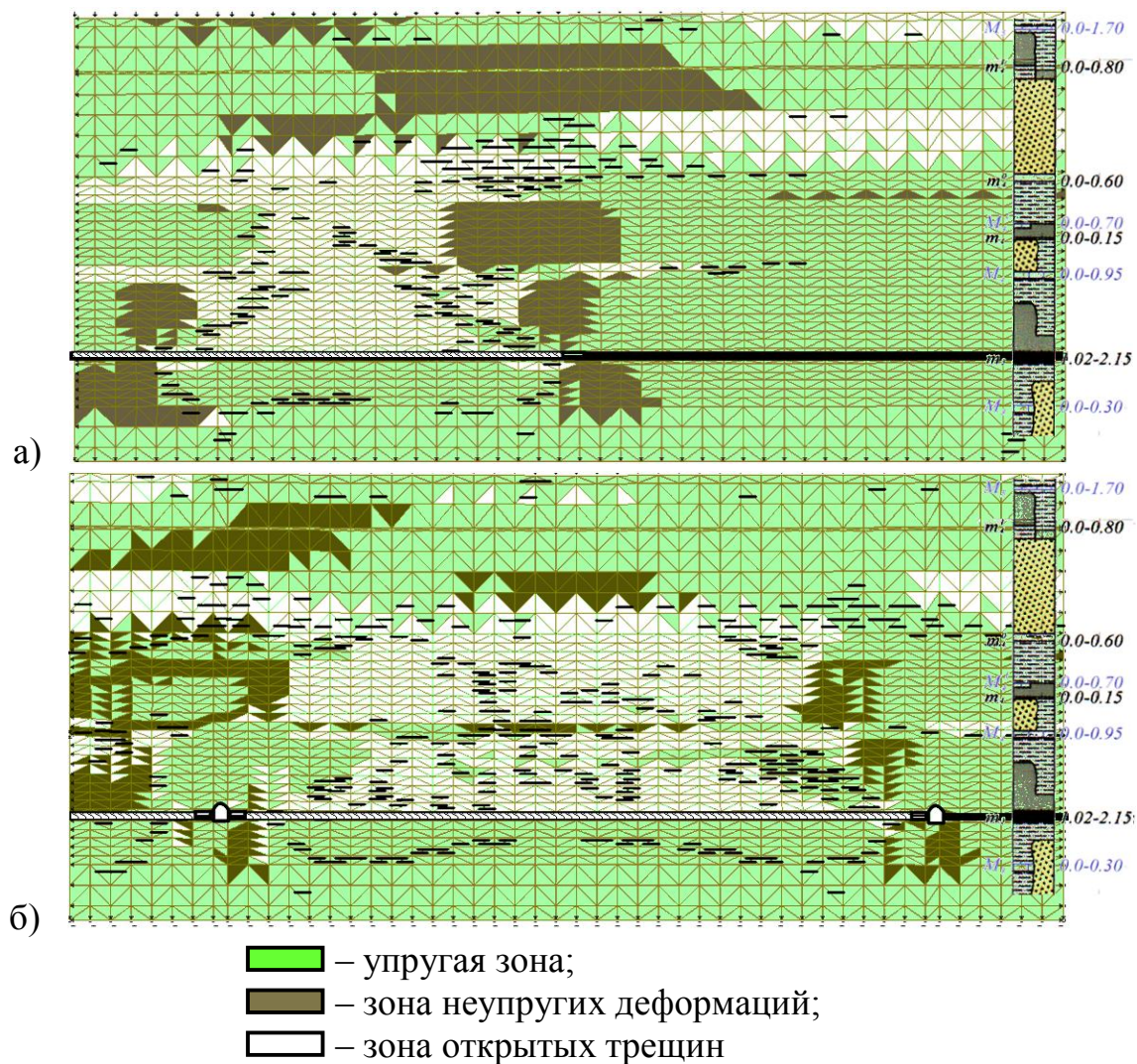


Рис. 1. Одновременное сопоставление разрушения породного массива вокруг очистного забоя: а – разрез по длине выемочного столба на начальном этапе его отработки; б – поперечный разрез выемочного столба в центральной зоне обрушения

Они одновременно являются как источниками газа метана, так и мощными концентраторами напряжений, препятствиями для фильтрации метана и определяющими конструктивными элементами газодерживающих полостей

Например, на уровне лавы (от нуля до минус 7 м) основную нагрузку несет тридцатиметровый слой песчаника (напряжения примерно 200 МПа, что дает коэффициент концентрации напряжений для глубины 1300 м равный 5,7), ближний шестиметровый слой песчаника уже разрушен, а максимальные напряжения в нем

наблюдаются на глубине плюс 7 м от груди забоя с коэффициентом концентрации равным 3,5. Непосредственная кровля начинает обрушаться прямо за механизированной крепью, полное обрушение первой пачки песчаника происходит в выработанном пространстве на расстоянии минус 40 м и пригружается обрушенными вышележащими породами, примерно на расстоянии 70–80 м полностью обрушается второй слой песчаника, при этом он опускается на нижележащие породы и увеличивает в них напряжения, а нагрузка от вышележащих пород в целом переходит на третий слой. Данные относительного перемещения пород кровли также подтверждают наличие характерных плоскостей разрушения (40 и 70 м в сторону выработанного пространства от груди забоя).

Совершенно иначе изменяются напряжения в первом и во втором слоях песчаников до посадки основной кровли. Несмотря на то, что первый слой песчаника разрушается уже над угольным пластом, напряжения в нем продолжают расти и достигают значений, превышающие даже первоначальные до его разрушения. Этот факт свидетельствует о возникновении локальной зоны всестороннего сжатия, которая обусловлена частичным разрушением второго слоя песчаника. В выработанном пространстве на расстоянии ≈ 20 –40 м за очистным забоем происходит дальнейшее оседание верхнего слоя песчаника, при этом он опускается на нижележащие породы и уплотняет нижний слой песчаника, а восстановленная нагрузка разгружает вышележащие породы. Напряжения в первом слое песчаника возрастают, во втором – падают.

С точки зрения анализа фильтрационных процессов наиболее информативны зоны открытых трещин (разрывных нарушений), так как по ним происходит движение метана, а главными движущими силами его фильтрации в массиве является давление свободного газа, содержащегося в крупных порах, трещинах, местах геологических нарушений закрытого типа, и изменяющееся напряженное состояние газоносного массива.

Следует еще обратить особое внимание на то, что *давление свободного газа в закрытых естественных или техногенных полостях может достигать 10 МПа и более*, а за счет влияния мощных прочных слоев песчаника величина максимальных главных напряжений в массиве горных пород даже на глубине 1300 м может снижаться до нулевых значений, а это автоматически приведет до временного подпора пород газом, что весьма опасно как в отношении суффлярных выделений газа метана, так и в отношении управления горным давлением. При этом необходимо учитывать, что главной движущей силой фильтрации метана в массиве является давление свободного газа, содержащегося в крупных порах, трещинах, местах геологических нарушений закрытого типа, и только в случае подвижек возможно влияние изменяющегося напряженного состояния породного массива.

Дебит метана из выработанного пространства в горные выработки определяется многими факторами, в том числе объемом зон обрушения и развитием систем магистральных трещин. На величину и длительность всплеска содержания метана влияет усиление вентиляции, которая способствует более интенсивному вымыванию метана из выработанного пространства. Однако постоянная подача завышенного количества воздуха, рассчитанного на максимально возможное газовыделение на участках, экономически нецелесообразна и во многих

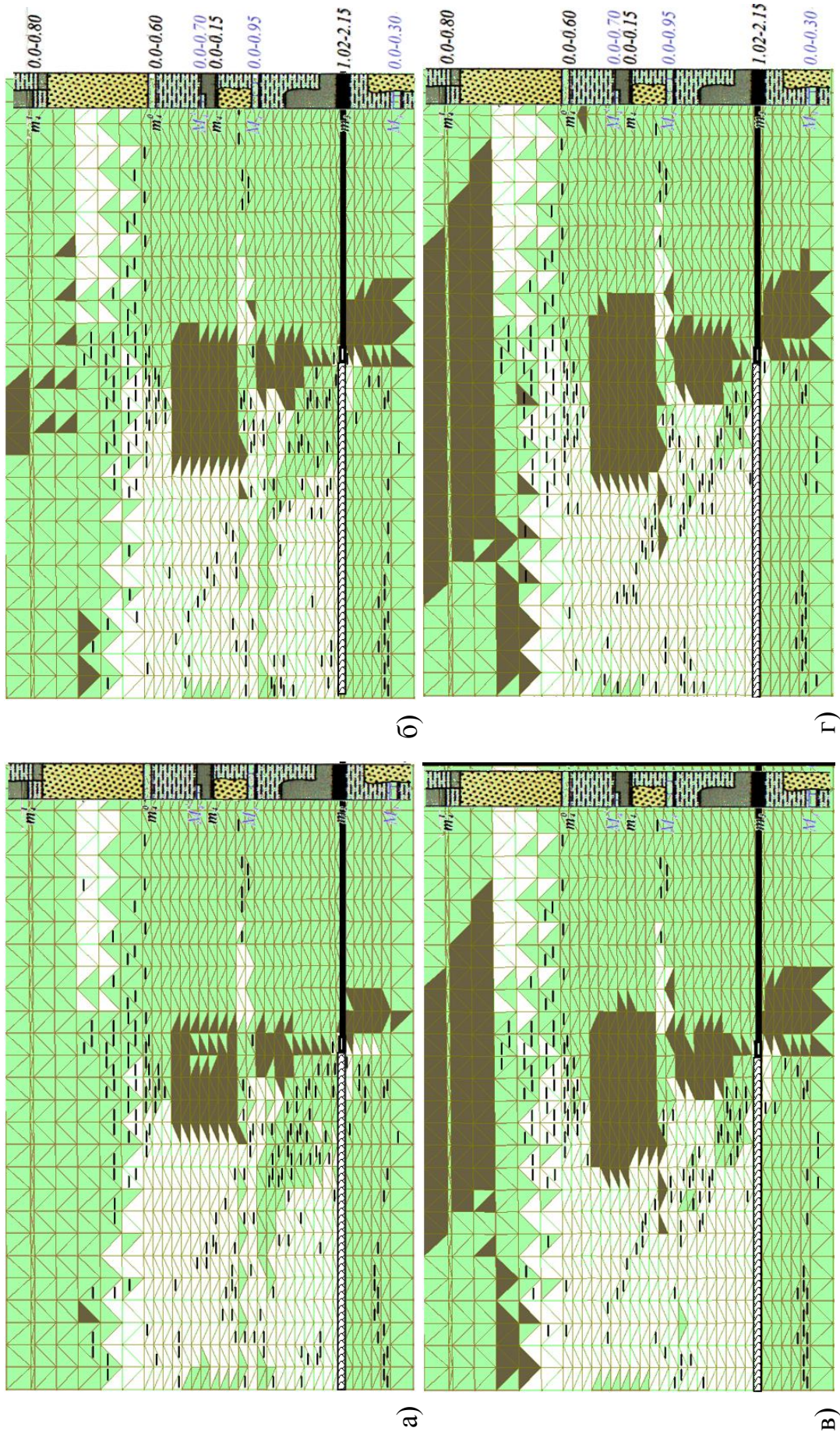
случаях технически неосуществима. Анализ характера поведения вентиляционного потока при посадке основной кровли позволяет выявить возможные пути оперативного управления проветриванием с целью создания безопасных условий труда горнорабочих и обеспечения экономичности проветривания.

Последовательность выполнения исследований по определению расположения и параметров зон разрушения состояла в оценке на каждом этапе деформационного процесса величин *главных нормальных и касательных напряжений в области влияния очистного забоя и в газонасыщенных песчаниках основной кровли, расположения и величины зон неупругих деформаций, ориентации систем техногенных трещин*. По результатам расчетов определялись пути перемещения газовых потоков от источников газовыделения в выработки выемочного участка на границе отработанного и подготовленного к отработке выемочного столба.

На рис. 2 показан поэтапный процесс развития разрушений в породном массиве при движении очистного забоя. Эта технология является определяющей при оценке влияния глубины отработки, геотектонических напряжений, качественного учета времени отработки угольного пласта или этапов разрушения породного массива. *Зная реальную скорость подвигания лавы, на основе решения обратной задачи появляется качественная возможность учесть временной фактор*. Но при этом необходимо также учитывать, что в то время, как для упруго-пластической области массива производятся строгие математические расчеты, то для запредельного состояния пород автоматически осуществляется его имитация тоже по строго определенным законам, но не по расчетным показателям, а по средним предполагаемым параметрам, поскольку в настоящее время еще не разработана необходимая теория расчетов дискретных сред.

Эту задачу с той или иной степенью точности мы частично решаем путем замены реальной прочности пород их длительной прочностью, которая составляет примерно 80-95 % от первоначальной, а также прочности разрушенных элементов остаточной прочностью, которая для зон объемного сжатия не может быть ниже $1/3$ первоначальной, а для зон растяжения равна, примерно, прочности на растяжение. Но при этом следует отметить, что наиболее точно временной фактор можно учесть только путем сопоставления расчетных данных с фактическими, полученными при проведении шахтных наблюдений или экспериментов. Для этого необходимо последовательно выполнить серию расчетов с различными коэффициентами увеличения (снижения) нагрузки расчетной схемы, определить реальное состояние какой-либо части массива, подобрать на соответствующее время наиболее подходящую расчетную схему и только после этого проводить качественный прогноз напряженно-деформированного состояния массива.

Для оценки газопроницаемости породного массива использованы коэффициенты газопроницаемости k_n , полученные для условий шахты им. А. Ф. Засядько в работе [5] в результате большого количества натурных измерений. В результате расчетов зон повышенного горного давления и разупрочнения (рис. 3) определена газопроницаемость для характерных зон: опорного давления ($k_n \approx 1,5$ мД), обрушения основной кровли ($k_n \approx 5000$ мД), оседания ($k_n \approx 5000$ мД), разгрузки ($k_n \approx 10$ мД), нетронутого массива ($k_n \approx 2$ мД).



— упругая зона; — зона неупругих деформаций; — зона открытых трещин
Рис. 2. Определяющая технология исследования разрушений в породном массиве (а-г)

На разных участках массива напряженное состояние газонасыщенных пластов песчаника основной кровли и степень их разрушения существенно отличаются (рис. 3). На неразрушенных участках они являются мощными концентраторами напряжений и препятствиями для фильтрации метана, а на разрушенных – основными источниками газовыделения и поступления метана в горные выработки.

Изменение знака напряжений (плюс при сжатии призабойной части и минус при растяжении) приводит к образованию сети новых и раскрытию существующих трещин и пор, что вызывает десорбцию газа из пластов и передвижение его в сторону очистной выработки и выработанного пространства. При этом самые интенсивные сдвиги горных пород происходят над движущимся забоем лавы или за ним. Впереди очистного забоя в зоне динамического опорного давления напряжения превышают геостатические, проницаемость массива снижается. В зоне динамического опорного давления (см. рис. 3) напряжения достигают 80-125 МПа (коэффициент концентрации напряжений 2,3-3,7), проницаемость породного массива снижается до 1-2 мД. При этом зона активизации сдвигов распространяется до 90 м впереди движущегося очистного забоя.

В процессе проведения очистных работ происходит разрушение подработанных породных слоев, в результате чего метан из нарушенных газоносных источников начинает мигрировать в выработанное пространство, создавая в массиве техногенные потоки различного направления и интенсивности. Движение газа происходит из участков с повышенным давлением в участки пониженного давления по открытым трещинам, поэтому анализ полученной в результате математического моделирования информации позволил выявить пути перемещения потоков метана через трещины в зонах сдвига и растяжения в выработанное пространство и рабочую зону лавы (показаны стрелками, см. рис. 3). При этом фильтрация газа в выработки происходит, в основном, из высокопористых песчаников, которые в сумме имеют большую мощность и могут интенсивно расслаиваться, и, в конечном счете, обрушаться даже без принудительной посадки кровли, выталкивая в выработки значительные объемы накопившегося в образовавшихся полостях газа.

При этом фильтрация газа в выработки происходит, в основном, из высокопористых песчаников, которые в сумме имеют большую мощность и могут интенсивно расслаиваться, и, в конечном счете, обрушаться даже без принудительной посадки кровли, выталкивая в выработки значительные объемы накопившегося в образовавшихся полостях газа.

Таким образом, проведенные исследования и математическое моделирование позволили установить направления газовых потоков, определить влияние напряженно-деформированного состояния массива и преобладающей трещиноватости на интенсивность выделения метана в выработки добычных участков глубоких шахт. Эти результаты являются базовыми для оценки распределения давления газа при известных значениях проницаемости массива, так и при решении обратных задач – установления искомой проницаемости по известному

распределению давления газа и дебиту метана, полученному по данным экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Булат А.Ф. Концепция комплексной дегазации углепородного массива на шахте им. А.Ф. Засядько / А.Ф. Булат // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ, 2003. – № 42. – С. 3 – 9.
2. Геомеханічний моніторинг підземних геотехнічних систем / А.В. Анциферов, С.І. Скіпочка, А.О. Яланський та ін. – Вид-во «Ноулідж», 2010. – 251 с.
3. Слащев И. Н. Моделирование трещиноватости как основа прогноза газового режима добычных участков глубоких шахт / И. Н. Слащев, М. Ю. Иконников // Сб. науч. трудов НГУ. – Днепропетровск : РВК НГУ, 2008. – № 31. – С. 236-245.
4. Экспериментально-аналитический метод прогноза направлений и интенсивности газовых потоков / А. Ф. Булат, С. А. Курносов, И. Н. Слащев и др. // Геотехническая механика. – Днепропетровск : ИГТМ НАНУ, 2005. – Вып. 59. – С. 10-21.
5. Звягильский Е.Л. Исследование процесса перераспределения метана в окрестности движущегося очистного забоя / Е.Л. Звягильский, Б.В. Бокий, В.В. Назимко. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 195 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Голиньком В.І.
Надійшла до редакції 30.11.2012*

УДК 622.271.3

© А.М. Лазников, Б.Е. Собко, У. Хена

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ВСКРЫТИЯ И РАЗВИТИЯ КАРЬЕРА МОТРОНОВСКО-АННОВСКОГО УЧАСТКА МАЛЫШЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Проведены исследования выбора эффективных вариантов вскрытия и развития горных работ при освоении Мотроновско-Анновского участка Малышевского месторождения.

Проведені дослідження вибору ефективних варіантів розкриття та розвитку гірничих робіт при освоєнні Мотронівсько-Аннівської ділянки Малишевського родовища.

Studies of choice of effective variants of dissection and development of mountain works are undertaken at mastering of Motrnovsko-Annovskoho of area of Malyshevskogo of deposit.

Развитие горнодобывающих предприятий, разрабатывающих месторождения титано-циркониевых руд, в современных рыночных условиях требует постоянного контроля рынка спроса и потребления выпускаемой продукции, подготовки и ввода в эксплуатацию новых участков. При этом вопросам совершенствования существующих технологических схем разработки руд и проектированию новых, перспективных технологических решений по открытой добыче россыпей должно уделяться первоочередное значение, как с точки зрения по-